

基于 FAI 方法的洱海蓝藻水华遥感监测*

张 娇, 陈莉琼**, 陈晓玲

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 利用 1999—2014 年 Landsat 卫星遥感影像数据, 采用浮游藻类指数 (FAI) 方法识别、提取洱海蓝藻水华信息, 进而获取蓝藻水华时空分布数据, 为进一步分析洱海蓝藻水华发生规律及监测预警提供参考。结果表明: 1999—2014 年洱海夏、秋季多次发生蓝藻水华, 以小型水华为主 (水华面积在 10 km² 以内), 大型水华现象主要发生在 2003、2006、2013 年, 其中 2006 年水华面积最大, 达到 42 km²。除近岸湖湾区域容易产生蓝藻堆积外, 洱海蓝藻大型水华主要发生在洱海北部和中部区域, 南部发生频次较少。近岸区域蓝藻堆积从春季开始, 中心水域水华发生在夏末和秋季 (8—11 月), 其中大型水华集中发生在 10 月左右。

关键词: 洱海; 蓝藻水华; 浮游藻类指数; Landsat; 时空分布

Monitoring the cyanobacterial blooms based on remote sensing in Lake Erhai by FAI

ZHANG Jiao, CHEN Liqiong** & CHEN Xiaoling

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, P.R.China)

Abstract: Based on Landsat satellite remote sensing imageries, cyanobacterial blooms in Lake Erhai during 1999 to 2014 were extracted by floating algae index (FAI) algorithm. According to the results, spatio-temporal distribution of cyanobacterial blooms was analyzed for the exploration of general regularity, long-term monitoring and early-warning. The results indicated that (1) cyanobacterial blooms mainly broke out in summer and autumn between 1999 and 2014, and almost at small scales. Large-scale blooms only occurred in the year of 2003, 2006 and 2013, with the maximum area of 42 km² in 2006. (2) Blooms were usually observed in the nearshore area and bays, but the northern and central regions were the area where large-scale cyanobacterial blooms broke out most frequently, while blooms in southern region broke out less. (3) Blooms in nearshore area broke out in spring, while in the central region generally broke out in later summer and autumn (from August to November). Moreover, large-scale and long-time lasted algal blooms were usually found around October.

Keywords: Lake Erhai; cyanobacterial blooms; floating algae index (FAI); Landsat; spatio-temporal distribution

洱海 (25°36′~25°58′N, 100°06′~100°18′E) 位于中国云南省西部的苍山东麓, 是云南省第二大淡水湖泊, 湖面面积约 250 km², 是沿湖居民生产生活的主要水源, 也是全国著名旅游胜地。近年来, 随着社会经济发展和人口增长, 人类活动对洱海的影响日渐加剧, 导致洱海水质不断下降, 水体富营养化趋势明显, 彭文启等^[1-2]对洱海水质的分析表明, 自 1990 年来, 洱海处于中营养水平, 当前正处于由中营养向富营养湖泊转变的过渡阶段。据相关资料^[3-4], 自 1996 年 9 月洱海首次发生大面积蓝藻水华以来, 洱海水域多次发生不同程度的蓝藻水华现象, 严重影响洱海水生态环境和沿湖居民的饮水安全。

蓝藻水华暴发是水体中蓝藻生物量急剧增加, 并在水面形成聚集的现象。大量藻类浮渣聚集在水体表面, 使水体反射率在近红外波段急剧上升, 形成类似植被的“陡坡效应”^[5], 与清洁水体在该波段较强的吸收

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07105-005)、国家自然科学基金项目 (41301366) 和 2015 测绘地理信息公益性行业科研专项 (201512026) 联合资助。2015-06-18 收稿; 2015-10-16 收修改稿。张娇 (1991~), 女, 硕士研究生; E-mail: zhangjiao112@whu.edu.cn。

** 通信作者; E-mail: chenlq@whu.edu.cn。

形成强烈反差,这些光谱特征为利用遥感方法监测蓝藻水华提供理论依据. 遥感技术可以提供多尺度、多光谱、多平台的蓝藻水华信息,并反映其时空特征,对于分析蓝藻水华暴发规律具有重要意义,并且已经在蓝藻水华监测中得到广泛应用. 许多学者利用 MODIS、NOAA/AVHRR、MERIS 等卫星数据,研究太湖、巢湖等蓝藻水华,取得较理想的结果^[6]. 金焰等^[7]利用 MODIS 数据开展太湖蓝藻水华时空分布规律提取方法研究,段洪涛等^[8]基于多源遥感数据,提出在太湖建立遥感提取蓝藻水华信息普适模式. 现阶段应用遥感技术监测洱海蓝藻水华的相关研究十分有限,Han 等^[9]利用 MERIS 数据研究了洱海叶绿素的动态分布,对于分析蓝藻水华有一定的参考,但是利用遥感手段直接监测洱海蓝藻水华的研究较少,有待进一步完善该方面的研究.

利用遥感技术监测洱海蓝藻水华,应从洱海自身湖泊面积较小,且水华主要以小型为主的特点出发,在卫星传感器选择上,除光谱特性能够较好识别蓝藻,还需考虑其空间分辨率. 以 MODIS 为例,虽然时间分辨率较高(Terra 和 Aqua 每天分别过境 1 次),识别蓝藻水华能力较好,但其空间分辨率较低(最高空间分辨率 250 m),对于监测小型湖泊蓝藻水华而言敏感性较低,且误差较大,通过对比水华同期 Landsat 和 MODIS 影像,发现 MODIS 影像不能有效获取水华精确信息,无法满足遥感监测洱海蓝藻水华的需求,而 Landsat 影像数据空间分辨率达 30 m,可以提供水华的细节信息,更适合用于洱海蓝藻水华监测^[10-11].

目前主要有单波段比值、比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、增强植被指数(EVI)等^[12-17]方法被应用于湖泊水华遥感监测,虽然这些方法均能够识别典型蓝藻水华区域,但是普遍存在受水体浑浊程度、蓝藻富集程度以及大气条件(气溶胶、大气散射)等外界干扰影响的问题,造成低浓度蓝藻水华区提取困难,蓝藻水华阈值难以统一等,难以满足精确提取蓝藻水华的要求. Hu^[18]提出浮游藻类指数(FAI)监测开阔海域中藻类信息,实验结果表明,与 NDVI、EVI 等方法相比,FAI 对于环境条件改变的敏感性更低,结果具有很好的稳定性,该方法增加的短波红外波段还可以对复杂大气环境进行校正,消除部分大气、薄云等的影响,是一种更为有效的蓝藻监测方法.

本文利用洱海地区 1999—2014 年 Landsat 卫星影像数据,采用 FAI 方法识别、提取洱海蓝藻水华信息,从而获取蓝藻水华时空分布数据,对进一步分析洱海蓝藻水华发生发展规律及建立洱海水华监测预警具有一定参考作用.

1 遥感数据和研究方法

1.1 遥感数据

本文选取 USGS 网站(<http://glovis.usgs.gov/>)下载的洱海地区 Landsat 卫星 1 级影像产品作为数据来源,利用目视检验剔除有云影像,共获取可用影像 167 景(表 1).

基于 ENVI 遥感影像处理软件,对影像数据进行辐射定标等预处理,其中对 Landsat7 ETM⁺影像进行条带修复处理. 为了剔除厚云覆盖对 FAI 结果的影响,采用波段阈值法进行云掩膜;利用纯净像元指数方法确定洱海水体矢量边界,提取水体,考虑到洱海北部罗时江和永安江入湖口的天然或人工湿地分布有大量水生植物,对水华提取易造成干扰,利用掩膜将其排除在外. 此外,由于 FAI 方法引入短波红外波段,能对复杂大气环境进行校正,部分消除大气影响,本文不考虑严格的大气校正.

1.2 蓝藻水华提取方法

当蓝藻在水面聚集形成水华时会改变该区域水体在红光、近红外、短波红外波段对辐射能量的强吸收特性,使水体光谱表现出与植被光谱相似的特征. FAI 方法采用红光、近红外、短波红外波段组合的方式,利用蓝藻和水体光谱特征差异,能够有效识别蓝藻. 其具体公式为:

$$FAI = \rho_{NIR} - \rho'_{NIR} \quad (1)$$

$$\rho'_{NIR} = \rho_{RED} + (\rho_{SWIR} - \rho_{RED}) \cdot \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{RED}}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED}} \quad (2)$$

式中, ρ_{RED} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR} 分别代表红光、近红外、短波红外波段的反射率; λ_{RED} 、 λ_{NIR} 、 λ_{SWIR} 分别表示红光、近红外、短波红外波段的中心波长, ρ'_{NIR} 为插值反射率,即红光和短波红外波段在近红外波段处采用线性内插方式得到的反射率信息.

表 1 Landsat 影像时间分布
Tab.1 Temporal distribution of Landsat images

月份	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	总计
1	—	1	3	2	3	3	2	3	—	2	1	2	1	—	2	3	28
2	—	—	2	—	3	2	2	2	1	1	2	1	—	1	2	—	19
3	—	—	—	2	2	1	—	—	2	1	1	—	—	—	1	1	11
4	—	1	1	2	1	1	—	1	1	—	—	—	—	—	1	1	10
5	—	—	1	—	—	2	1	1	—	—	—	2	1	2	—	1	11
6	—	—	1	2	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	2	—	6
7	—	1	—	1	—	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	5
8	—	—	2	—	1	—	—	1	—	—	1	—	—	—	—	—	6
9	1	—	—	—	—	—	1	—	—	1	—	1	1	1	—	2	7
10	—	1	—	2	2	2	1	—	—	—	1	1	1	1	1	2	15
11	1	3	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	3	1	27
12	—	2	2	1	1	3	—	3	2	1	1	2	—	1	3	—	22
合计	2	9	14	14	15	17	10	13	8	7	9	10	5	8	15	11	167

利用 *FAI* 方法识别蓝藻水华, 需要卫星影像同时提供红光、近红外、短波红外波段的反射率信息, Landsat 卫星的 TM、ETM⁺、OLI 传感器均包含这 3 个波段, 满足使用该方法提取蓝藻信息的条件. *FAI* 对应 Landsat 卫星不同传感器波段及中心波长信息见表 2.

表 2 *FAI* 对应卫星传感器波段及中心波长 (nm)
Tab.2 The bands and central wavelength of different satellite sensors when using *FAI*

波段	Landsat-5 TM	Landsat-7 ETM ⁺	Landsat-8 OLI
红光	630~690(660)	630~690(662)	630~680(654.6)
近红外	760~900(840)	775~900(835)	845~885(864.6)
短波红外	1550~1750(1676)	1550~1750(1648)	1560~1660(1609.0)

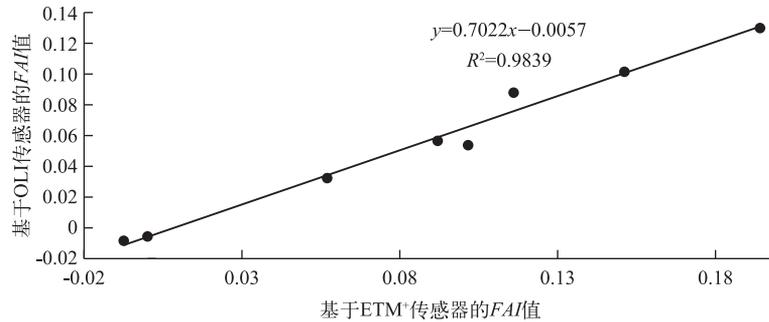
1.3 蓝藻水华阈值及强度分级

理论上由于蓝藻水华区域与水体光谱特征存在差别, 在蓝藻水华和非水华的边界区域, *FAI* 结果会有较大差异, 从而像元变化率也较大, 通过计算 *FAI* 结果影像的像元坡度, 统计坡度最大处的 *FAI* 值, 可以确定水华阈值, 并且该方法避免了人工目视解译确定阈值的主观性. 由于水中微粒和藻类浮渣等的影响可能使无水华区和蓝藻富集区出现像元变化率较大的情况, 影响阈值的选取, 所以在统计之前, 参照 Hu 等^[19] 在太湖的研究, 利用 $FAI < -0.01$ 和 $FAI > 0.02$ 排除这些区域的干扰.

统计发现, 同种传感器影像结果的水华阈值比较接近, 而不同传感器的阈值则相差较大, 主要体现在 OLI 在波段设置上同 TM、ETM⁺ 有一定差异, 这给统一水华阈值和水华强度分级带来困难, 为了解决这个问题, 本文借鉴经验线性公式^[20] 对 *FAI* 结果进行归一化处理, 从而将其校正到相同的标准上.

对相同地物而言, 在不同传感器下测得的反射率满足一定的线性关系, 可以采用经验线性公式对其进行纠正. 同样, 根据波段线性组合得到的 *FAI* 结果也可以借鉴这一方法, 对不同传感器结果进行归一化处理. 本实验以 OLI 传感器的 *FAI* 结果为参照, 建立与 TM、ETM⁺ 结果的线性关系 (图 1), 通过选取地面不变像元 (道路、建筑等) 建立 OLI 与 ETM⁺ 结果的线性关系, 并且通过验证, 能满足大部分结果的要求.

刘聚涛等^[21] 根据蓝藻水华面积和叶绿素浓度提出太湖蓝藻水华分级评估方法, 但是对于洱海这样主要以小型水华为主的小面积湖泊, 除了以水华面积为指标对单次水华进行整体评估, 水华发生时的强度空间分布往往也是关注的重点, 确定水华强度分布可以为蓝藻水华高强度聚集区的重点治理提供参考. 参照相关文献中蓝藻水华强度等级划分方法^[22], 采用等间隔方法确定强度分级阈值, 将洱海蓝藻水华区分成 3 级,

图1 OLI 和 ETM⁺传感器 FAI 结果的线性关系Fig.1 The linear relationship between FAI based on OLI and ETM⁺

水华风险一级 ($-0.006 < FAI \leq 0$)、风险二级 ($0 < FAI \leq 0.006$)、风险三级 ($FAI > 0.006$), 水华程度依次加重, 以确定水华发生强度的空间分布差异。

2 结果与分析

通过对 1999—2014 年 Landsat 卫星洱海蓝藻水华监测影像的信息进行统计分析, 得到基于遥感监测的洱海蓝藻水华时空分布数据。

2.1 洱海蓝藻水华时空分布

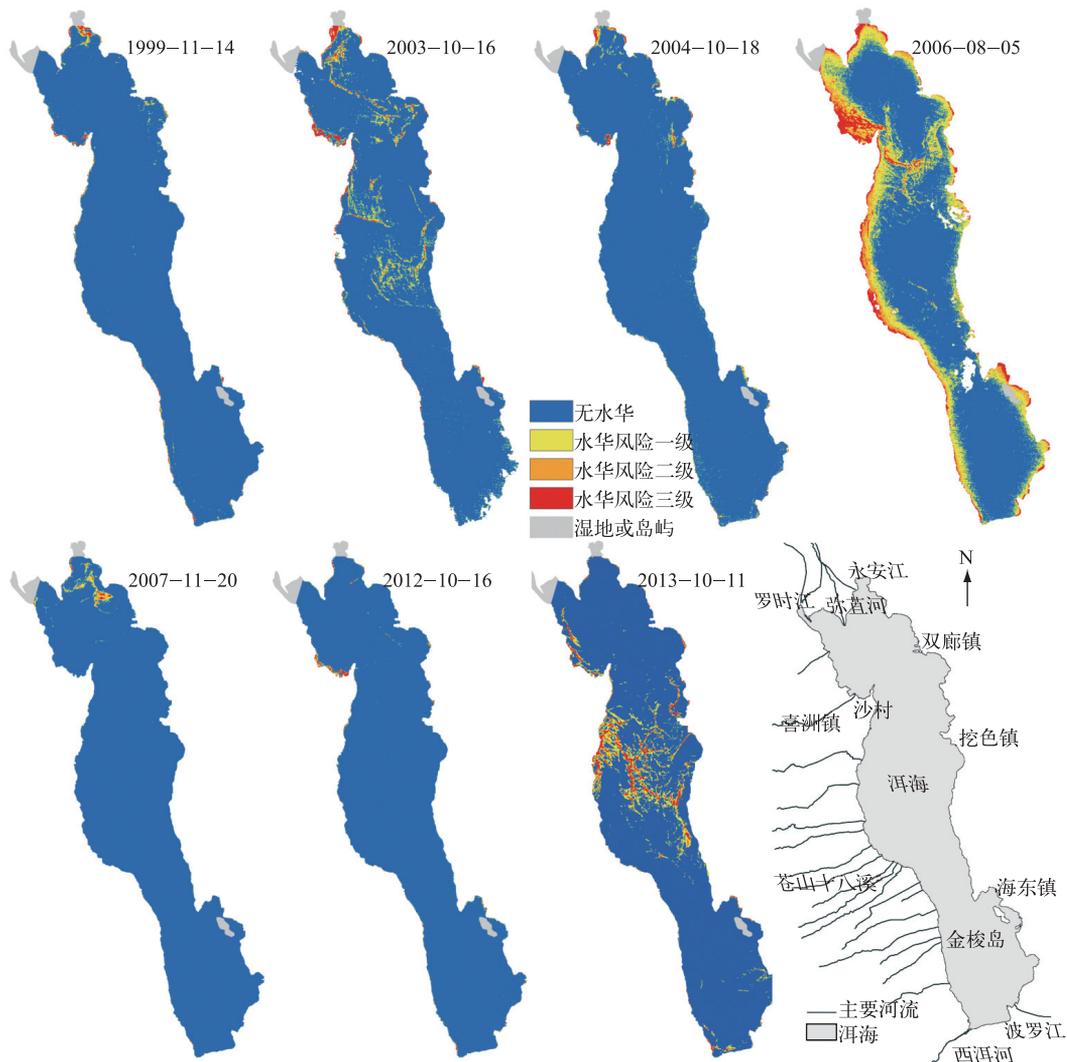
2.1.1 洱海蓝藻水华空间分布 从统计结果来看, 洱海大部分水域都发生过蓝藻水华, 其中湖湾区域受地理位置的限制, 水体流动性较小, 较之湖心区受人类活动的影响更大, 污染物更容易堆积, 导致水质恶化, 水体富营养化加剧。此外水体表层的藻类受风浪影响比较大, 跟随水流的运动, 容易在湖湾和近岸区域聚集, 发生蓝藻堆积现象, 形成水华。1999 年 9 月 11 日首次监测到洱海蓝藻水华现象, 就发生在北部近岸湖湾地区 (图 2)。西岸喜洲镇沙村湾、海东金梭岛湖湾和西洱河口等是主要的蓝藻水华发生区, 水华现象频繁发生。

在卫星遥感监测到的较大型蓝藻水华中, 洱海北部和中部区域频次最高, 北部区域水华主要集中在距西岸喜洲镇沙村湾和东岸永安江入湖口及距双廊镇较近的区域; 而中部湖心区域是较大型水华的集中分布区, 从 2003 年 10 月 16 日、2006 年 8 月 5 日及 2013 年 10 月 11 日的蓝藻水华分布可以看出, 大范围水华主要分布在中部湖心区; 南部区域则相对较少, 除在 1999、2000 和 2002 年南部西岸附近监测到小范围水华, 以及 2013 年全水域暴发水华时在南部监测到蓝藻水华, 其它时间几乎没有在南部中心区监测到蓝藻水华 (图 2)。

2.1.2 洱海蓝藻水华时间分布 根据监测结果, 洱海蓝藻水华发生时间主要集中在春末和夏、秋季, 最早发现蓝藻堆积一般是 5 月左右的沿岸湖湾区域, 但范围较小, 水华强度也较小; 卫星监测到的洱海中心水域水华集中发生在夏末和秋季 (8—11 月), 其中 10、11 月份最为频繁 (图 3), 如 1999 年 11 月 14 日、2000 年 10 月 7 日、2002 年 10 月 29 日、2003 年 10 月 16 日、2004 年 10 月 18 日、2007 年 11 月 20 日、2012 年 10 月 16 日和 2013 年 10 月和 11 月都监测到蓝藻水华; 并且 2013 年 12 月 6 日在北部西岸附近发现蓝藻水华, 是历次水华中发生时间最晚的 1 次。

2.2 蓝藻水华发生规模

Landsat 卫星影像监测结果显示, 洱海蓝藻水华以小型水华为主 (图 4), 对历年水华最大覆盖面积统计结果表明, 较大范围水华集中发生在 2003 年 10 月、2006 年 8 月和 2013 年 10 月、11 月, 面积分别达到 20、42 和 28 km²。其余年份除 2001、2005、2008、2011 年等没有在中心水域监测到蓝藻水华外, 均发现小范围水华现象, 如 1999 年 11 月、2000 年 10 月、2002 年 10 月北部和南部小型水华; 2004 年 10 月、2007 年 11 月、2012 年 10 月北部小范围水华; 2010 年 9 月中部区域发生小范围水华; 但是蓝藻水华规模较小, 覆盖面积均没有超过 10 km²。

图 2 *FAI* 方法提取洱海蓝藻水华结果Fig.2 The results of extracting cyanobacterial bloom using *FAI*

3 讨论

准确识别、提取蓝藻水华信息的关键是区分水华区和非水华区, *FAI* 方法利用蓝藻水华区在近红外波段的高反射率提取蓝藻和水体在短波红外的强吸收性降低大气干扰, 降低了对环境条件的敏感性, 可以识别低浓度蓝藻水华区域, 较准确提取蓝藻水华, 与其它识别蓝藻方法相比, 具有明显优势. 本文结合 Landsat 卫星影像, 采用 *FAI* 方法提取蓝藻水华信息, 获取了较精确的洱海蓝藻水华信息, 为分析洱海蓝藻水华时空规律提供数据支持.

受到遥感卫星时间分辨率和天气影响等限制, 遥感影像只能监测到部分水华信息, 在缺失影像的时间内, 可能会遗漏水华信息, 无法全面反映水华暴发的规律和趋势^[23]. 并且洱海蓝藻水华多发生在夏、秋季, 此时正值雨季, 阴雨、多云天气较多, 由获取影像的时间分布 (表 1) 也可看出, 6—9 月可用影像较少, 所以监测结果可能无法完全准确反映夏季洱海蓝藻水华发生情况. 但是遥感影像能够定期快速获取整个水域的水

华信息,监测到的水华发生时间和分布,在一定程度上可以弥补人工监测的缺失。

洱海中心水域水华主要发生在夏末和秋季.藻类生物的生长受水温影响较大,春季气温回升,平均气温升至 15℃,使湖区内蓝藻开始逐渐复苏,夏季平均气温超过 20℃,为蓝藻繁殖提供了适宜的温度条件;同时洱海地区干湿季明显,冬、春季属于干季,夏季为雨季,雨季降雨量占全年降水的 80%以上,降雨能够增加地表径流,使陆源污染物流入湖区,增加湖区氮、磷等营养物质积累;当雨季临近结束,持续强日照、高温天气,会诱发蓝藻迅速繁殖,形成水华,所以监测到的洱海水华集中发生在夏末和秋季,尤其是大规模水华都发生在 10 月份左右,此时降雨量较小,日照充足,且气温一直维持在较高水平.洱海蓝藻水华除了受到藻类自身生理特性的影响,与洱海地区环境条件也有密切关系。

从蓝藻暴发区域来看,洱海全部水域都有监测到蓝藻水华现象,一般水华最早发生于近岸、湖湾水域,然后扩散至洱海中心水域;中心水域水华则主要集中在北部和中部区域.湖湾水域由于其地理位置的限制,水

流流速较慢,污染物不易扩散;近岸区域及河流入湖口是陆源污染物入湖的主要途径,该区域受人类活动影响比较大,也导致污染物浓度增大,从而使水体富营养化,造成藻类大量繁殖,进而发生水华.洱海近 60%的水量来自北部,水质受北部污染影响较大,同时洱海北部农田面积较大,约占全流域的 58%,农业污染比较严重,严重影响了洱海水质^[24].由洱海水质数据^[25]可以看出,洱海水域总氮、总磷浓度分布呈现四周沿岸高于中心区域;北部、南部高于中部,营养盐的积累为蓝藻大量快速繁殖提供有利条件.另外水华发生的空间分布及扩散还受到风场作用下水体流场的影响,洱海流域盛行东南季风和西南季风,水体受风力影响形成的区域环流对蓝藻水华的发生、发展扩散有很大影响,由洱海水下地形可知,洱海中部湖心区域水深,南部水浅,水深较浅区域水体受风力拖拽作用明显,流速较大,一定程度上抑制了蓝藻的发生,而中部湖心区属于深水区,水体流速较小,在环流作用影响下,更利于蓝藻聚集上浮,形成水华.所以不难理解,监测到的大规模水华,都集中分布在中部湖心区域。

在湖泊营养盐条件满足蓝藻生长的前提下,蓝藻水华的发生与气温、水温、光照、气压、风速等气象条件有密切关系^[26-27],在高温、强光照并且风速较低等有利的气象条件下,极易促使蓝藻上浮聚集,暴发水华.同时查阅洱海地区历史气象数据,发现在洱海发生蓝藻水华的年份,也普遍存在气温较正常偏高、日照量偏多等特点,但是并没有严格验证水华发生与气象条件的关系,下一步可以考虑利用洱海地区气象数据,对蓝藻水华发生发展趋势作进一步分析,探究洱海蓝藻水华暴发规律。

4 结论

通过利用 1999—2014 年 Landsat 卫星影像监测洱海蓝藻水华,发现洱海水域水华以小型为主,大范围水华主要集中在 2003、2006、2013 年,最大水华覆盖面积达到 42 km²,其他年份水华时有发生,但是总体趋于稳定,水华面积在 5~10 km²以内,且年际变化不是特别明显.洱海蓝藻水华最早于每年 5 月左右在近岸和湖湾

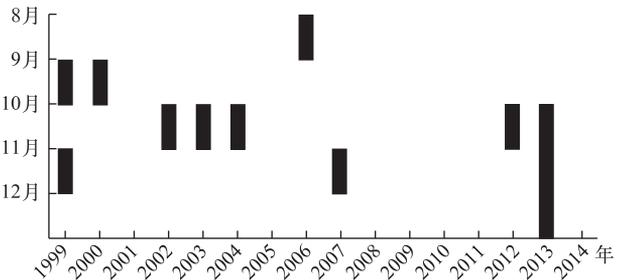


图 3 洱海夏、秋季蓝藻水华时间分布(1999—2014 年)

Fig.3 The time distribution of cyanobacterial bloom in Lake Erhai in Summer and Autumn from 1999 to 2014

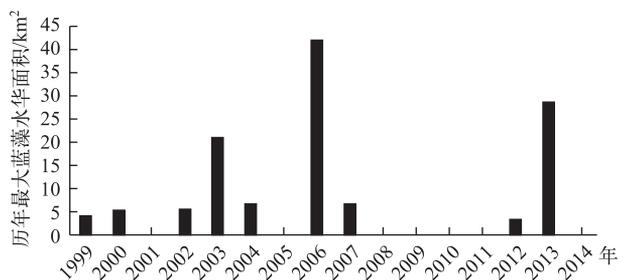


图 4 1999—2014 年洱海历年最大蓝藻水华面积

Fig.4 The maximum cyanobacterial bloom area in Lake Erhai from 1999 to 2014

处发生,中心水域水华发生在夏末和秋季(8—11月),其中大规模水华集中发生在10月份左右.洱海全水域都有监测到过蓝藻水华,湖湾地区受其地理位置的限制,容易造成蓝藻堆积,中心水域水华主要暴发区域集中在洱海北部和中部,南部区域发生水华的频次较低.

5 参考文献

- [1] Peng Wenqi, Wang Shiyan, Liu Xiaobo. Assessment on water quality of Lake Erhai. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, **3**(3): 192-198(in Chinese with English abstract). [彭文启, 王世岩, 刘晓波. 洱海水质评价. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(3): 192-198.]
- [2] Yang Xiaoxue. Analysis on total phosphorus and total nitrogen pollution in Lake Erhai. *Yunnan Environmental Science*, 2006, **25**(B6): 113-115, 112(in Chinese with English abstract). [杨晓雪. 洱海总磷、总氮污染现状分析. 云南环境科学, 2006, **25**(B6): 113-115, 112.]
- [3] Lü Xingju, Zhu Jiang, Meng Liang. Pilot Study on diversity of cyanobacteria bloom in Lake Erhai. *Environmental Science Survey*, 2010, **29**(3): 32-35(in Chinese with English abstract). [吕兴菊, 朱江, 孟良. 洱海水华蓝藻多样性初步研究. 环境科学导刊, 2010, **29**(3): 32-35.]
- [4] Wang Yun. Study on the group development of cyanophyta and the cause of algal bloom in Lake Erhai in summer and autumn. *Journal of Dali University*, 2008, **17**(12): 39-42(in Chinese with English abstract). [王芸. 洱海夏秋季蓝藻种群动态变化及水华成因分析. 大理学院学报, 2008, **7**(12): 39-42.]
- [5] Ma Ronghua, Kong Fanxiang, Duan Hongtao *et al.* Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite imageries in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2008, **20**(6): 687-694(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2008.0605. [马荣华, 孔繁翔, 段洪涛等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 687-694.]
- [6] Wen Xinlong, Jing Yuanshu, Zhang Di. Review on application of common satellite sensors in monitoring algal blooms. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(1): 81-87(in Chinese with English abstract). [温新龙, 景元书, 张娣. 常见卫星传感器在蓝藻水华监测中的应用进展. 环境科学与技术, 2014, **37**(1): 81-87.]
- [7] Jin Yan, Zhang Yong, Jiang Sheng. Application of EOS/MODIS data for research of cyanobacteria bloom spatio-temporal distribution in Taihu Lake. *Environmental Science and Technology*, 2009, **22**(A2): 9-11(in Chinese with English abstract). [金焰, 张咏, 姜晟. EOS/MODIS 数据在太湖蓝藻水华时空分布规律提取中的应用研究. 环境科技, 2009, **22**(A2): 9-11.]
- [8] Duan Hongtao, Zhang Shouxuan, Zhang Yuanzhi. Cyanobacteria bloom monitoring with remote sensing in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2008, **20**(2): 145-152(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2008.0202. [段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 145-152.]
- [9] Han Xingxing, Feng Lian, Chen Xiaoling *et al.* MERIS observations of chlorophyll-a dynamics in Lake Erhai between 2003 and 2009. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, **35**(24): 8309-8322.
- [10] Vincent RK, Qin X, McKay RML *et al.* Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(3): 381-392.
- [11] Li Xuwen, Niu Zhichun, Jiang Sheng. Study of reflectance spectra characteristics of cyanobacterial blooms in Lake Taihu on Landsat5 Thematic Mapper Imagery. *Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2010, **22**(6): 25-31(in Chinese with English abstract). [李旭文, 牛志春, 姜晟. Landsat5 TM 遥感影像上太湖蓝藻水华反射光谱特征研究. 环境监测管理和技术, 2010, **22**(6): 25-31.]
- [12] Zhu Li, Wang Qiao, Wu Chuanqing *et al.* Monitoring and annual statistical analysis of algal blooms in Chaohu based on remote sensing. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(2): 162-166(in Chinese with English abstract). [朱利, 王桥, 吴传庆等. 巢湖水华遥感监测与年度统计分析研究. 中国环境监测, 2013, **29**(2): 162-166.]
- [13] Liu Xiaoyan, Ni Feng, Zhou Yuhong. Spatio-temporal rules of the blue-green algae blooms in the Taihu Lake based on MODIS data. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2012, **35**(1): 89-94(in Chinese with English abstract). [刘晓艳, 倪峰, 周玉红. 基于 MODIS 的太湖蓝藻水华暴发时空规律分析研究. 南京师大学报: 自然科学版, 2012, **35**(1): 89-94.]
- [14] Zhou Liguo, Feng Xuezhi, Wang Chunhong. Monitoring cyanobacteria bloom based on MODIS data in Lake Taihu. *J Lake*

- Sci, 2008, **20**(2): 203-207(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2008.0211. [周立国, 冯学智, 王春红等. 太湖蓝藻水华的 MODIS 卫星监测. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 203-207.]
- [15] Chen Yun, Dai Jinfang. Extraction methods of cyanobacteria bloom in Lake Taihu based on RS data. *J Lake Sci*, 2008, **20**(2): 179-183(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2008.0207. [陈云, 戴锦芳. 基于遥感数据的太湖蓝藻水华信息识别方法. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 179-183.]
- [16] Xie Huaming, Pan Fakang, Shu Ying *et al.* Temporal and spatial distribution study of algal blooms in Lake Chaohu based on remote sensing. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(21): 12825-12827(in Chinese with English abstract). [解华明, 潘法康, 舒莹等. 巢湖蓝藻水华时空分布特征遥感监测研究. 安徽农业科学, 2011, **39**(21): 12825-12827.]
- [17] Hu Zunying, Yu Haiyan, Zhou Bin. MODIS band ratio algorithm about cyanobacteria bloom in Lake Taihu applied in emergent monitoring. *Wetland Science*, 2009, **7**(2): 169-174(in Chinese with English abstract). [胡尊英, 于海燕, 周斌. MODIS 波段比值算法在太湖蓝藻水华预警及应急监测中的应用. 湿地科学, 2009, **7**(2): 169-174.]
- [18] Hu CM. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(10): 2118-2129.
- [19] Hu C, Lee Z, Ma R *et al.* Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, **115**(C4).
- [20] Smith GM, Milton EJ. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(13): 2653-2662.
- [21] Liu Jutao, Gao Junfeng, Zhao Jiahu *et al.* Method of cyanobacteria bloom hazard degree evaluation in Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2010, **30**(6): 829-832(in Chinese with English abstract). [刘聚涛, 高俊峰, 赵家虎等. 太湖蓝藻水华灾害程度评价方法. 中国环境科学, 2010, **30**(6): 829-832.]
- [22] Li Xuwen, Niu Zhichun, Jiang Sheng *et al.* Design of intensity and build-up degree classification algorithm development for cyanobacteria blooms in Lake Taihu based on satellite remote sensing. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, **23**(5): 23-30(in Chinese with English abstract). [李旭文, 牛志春, 姜晟等. 基于卫星影像的太湖蓝藻水华遥感强度指数和等级划分算法设计. 环境监测管理和技术, 2011, **23**(5): 23-30.]
- [23] Zhao Jiahu, Gao Junfeng, Liu Jutao *et al.* Determination of spatial and temporal distribution of cyanobacterial water bloom in Taihu Lake using MODIS image data. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(12): 1475-1480(in Chinese with English abstract). [赵家虎, 高俊峰, 刘聚涛等. 应用 MODIS 监测太湖蓝藻水华时空分布特征. 长江流域资源与环境, 2012, **20**(12): 1475-1480.]
- [24] Yin Yanzhen, Chu Zhaosheng, Zhao Ming *et al.* Spatial and temporal changes in water quality in aquatic-terrestrial ecotone of Lake Erhai. *China Environmental Science*, 2011, **31**(7): 1192-1196(in Chinese with English abstract). [尹延震, 储昭升, 赵明等. 洱海湖滨带水质的时空变化规律. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1192-1196.]
- [25] Sun Weihua, Xu Changcheng, Yan Gugen *et al.* Analysis of the temporal and spatial variation of total nitrogen and total phosphorus in Lake Erhai. *Environmental Science Survey*, 2013, **32**(A1): 6-48(in Chinese with English abstract). [孙伟华, 徐长城, 严谷芬等. 洱海总磷, 总氮时空变化规律分析. 环境科学导刊, 2013, **32**(A1): 6-48.]
- [26] Xie Guoqing, Li Meng, Lu Weikun *et al.* Spectral features, remote sensing identification and breaking-out meteorological conditions of algal bloom in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2010, **22**(3): 327-336(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2010.0304. [谢国清, 李蒙, 鲁韦坤等. 滇池蓝藻水华光谱特征, 遥感识别及暴发气象条件. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 327-336.]
- [27] Kong Fanxiang, Ma Ronghua, Gao Junfeng *et al.* The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 314-328(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2009.0302. [孔繁翔, 马荣华, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华的预防, 预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 314-328.]